DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170037

刘海曼, 郭凯, 李晓光, 刘小京. 地膜覆盖对春季咸水灌溉条件下滨海盐渍土水盐动态的影响[J].中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170037

Liu H M, Guo K, Li X G, Liu X J. Effect of plastic film mulch on soil moisture and salt dynamics under saline water irrigation in coastal saline soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170037

地膜覆盖对春季咸水灌溉条件下滨海盐渍土水盐动态的影响*

刘海曼[1,2], 郭　凯[1], 李晓光[1,2], 刘小京[1]**

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室　石家庄　050022; 2. 中国科学院大学　北京　100049)

摘　要: 在河北省沧州市海兴县选取耕层土壤初始含水量有较大差异的两个地块, 于春季利用当地高矿化度咸水(10~15 g·L^{-1})进行灌溉和地膜覆盖, 以探究地膜覆盖对春季咸水灌溉条件下滨海盐渍土水盐动态的影响。设不灌咸水不覆膜(对照, CK)、不灌咸水覆膜(PM)及3月29日和4月13日灌咸水不覆膜(SE、SL)、灌咸水后覆膜(SE+PM、SL+PM)6个处理探讨不同咸水灌溉和覆膜对土壤水盐动态的影响; 另在耕层土壤含水量≥20%(海兴县小山乡)和<20%(海兴县农场)两个地点分别设灌咸水后覆膜(SE+PM)和不灌咸水不覆膜(CK)处理, 探讨初始土壤含水量对咸水灌溉下土壤水盐动态的影响。灌水量均为180 mm, 灌溉咸水来自排水渠, 矿化度分别为12.12 g·L^{-1}和11.53 g·L^{-1}, 咸水入渗后, 播种油葵。结果表明: 春季咸水灌溉后覆膜能有效降低耕层土壤盐分, 并且该项措施实施的时间越早越好, 脱盐深度和脱盐率均较深和较高, 本研究中, 脱盐效果最优的为SE+PM处理, 该处理在油葵收获后0~5 cm脱盐率为58.93%, 土壤含盐量由1.15%降至0.51%。此外, 脱盐效果也受到土壤初始含水量的影响, 耕层土壤含水量<20%时, 春季咸水灌溉覆膜处理对土壤盐分的淋洗效果较好, 平均脱盐深度大于40 cm, 保证了油葵正常生长, 油葵出苗率和产量分别为73.9%和920 kg·hm^{-2}, 至油葵收获时, 0~20 cm土层土壤含盐量由灌溉前的1.93%降低至0.32%, 脱盐率达84.07%; 而当耕层土壤含水量≥20%时, 脱盐速度慢、深度浅, 至油葵播种时, 土壤盐分依然较高, 导致油葵出苗率低, 最终绝收。本研究通过利用春季高矿化度咸水灌溉和地膜覆盖措施, 在春季干旱和土壤严重积盐条件下有效降低了耕层土壤盐分, 为作物播种出苗提供适宜的土壤水分条件和低盐环境。

关键词: 重盐碱土壤; 咸水灌溉; 地膜覆盖; 土壤含盐量; 土壤含水量; 土壤水盐动态

中图分类号: S156.4+2　　**文献标识码:** A

Effect of plastic film mulch on soil moisture and salt dynamics under saline water irrigation in coastal saline soils*

Liu Haiman[1,2], Guo Kai[1], Li Xiaoguang[1,2], Liu Xiaojing[1]**

(1. Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences/Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Filed experiments were conducted to study the dynamics of soil moisture and salt under saline water irrigation and plastic film mulching in coastal saline soils in spring in Haixing County, Hebei Province. Two field sites were selected — Xiaoshan Town with original soil moisture content ≥20% and Haixing Farm with original soil moisture content <20%. A total of 6 treatments were designed for Xiaoshan Town, involved saline water irrigation at March 29th and April 13th with and without plastic film mulching, and plastic film mulching only with no irrigation without plastic film mulching as the control. The treatments in Haixing Farm were CKN (no irrigation without plastic film mulching) and SE+PMN (saline water iriigation with plastic film mulching). The irrigation water was ponded from the drainage ditch along the field with salinity of 12.12 g·L^{-1} and 11.53 g·L^{-1} for Xiaoshan Town and Haixing Farm, respectively. The irrigation amount was 180 mm in both sites. Oil sunflower was planted after irrigation. Results showed that soil salt content in plough layer significantly reduced under saline water irrigation and plastic film mulching. The earlier the

* 国家科技支撑计划项目(2013BAD05B01)和中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-SW-STS-141-04-1)资助
**通讯作者: 刘小京, 主要研究方向为盐渍地区水土高效利用, E-mail: xjliu@sjzam.ac.cn
刘海曼, 主要研究方向为盐渍地区水土高效利用, E-mail: 18633073945@163.com
收稿日期: 2017-01-01　接受日期: 2017-05-14

* This research was supported by the National Key Technology Research and Development Program of China (2013BAD05B01) and Science and Technology Service Network Initiative(KFJ-SW-STS-141-04-1).
**Corresponding author, E-mail:xjliu@sjzam.ac.cn
Received Jan. 1, 2017; accepted May 14, 2017

application of the treatment, the better the salt leaching effect obtained. Moreover, salt leaching effect was affected by the original soil water content. A better salt leaching effect was observed in Haixing Farm, and the average salt leaching depth was 40 cm. This ensured the normal growth of oil sunflower, with germination rate and yield of 73.9% and 920 kg·hm^{-2}, respectively. Soil salt content decreased from 1.93% before irrigation to 0.32% at harvest stage of oil sunflower, with mean salt leaching rate of 84.07%. For the Xiaoshan Town experimental site, however, water was infiltrated through soil macro-pores and it was difficult for salt to leach out from soil micro-pores. Thus water infiltration at the rate of saturated hydraulic conductivity, which led to slow leaching rate and shallower leaching depth of soil salt. High soil salinity was maintained at sowing of oil sunflower limited its' normal growth and therefore no yield was obtained. In the research, soil salinity in plough layer reduced effectively through saline water irrigation and plastic film mulching in spring. This provided a suitable soil water and lower salinity for the normal germination of crops in coastal saline soils.

Keywords: Heavy saline soil; Saline water irrigation; Plastic film mulching; Soil salinity; Soil moisture content; Dynamic of soil water and salt

淡水资源匮乏和土壤盐碱是制约环渤海地区农业发展和生态环境改善的主要因素[1]，如何利用有限的水资源和合理开发现有的咸水资源是该地区盐碱地改良中面临的问题。王遵亲等[1-2]指出盐分在土壤中的运动具有明显的季节性的变化特征，在环渤海地区土壤呈春、秋、冬 3 季积盐，夏季脱盐的变化过程，其中春季土壤积盐最为严重。而春季又是作物出苗和生长的盐敏感时期，因此如何在春季创造耕层土壤低盐条件是该地区盐碱地改良的关键。

在淡水资源短缺的状况下，环渤海地区丰富的地下咸水成为潜在可利用的水资源。国内外针对咸水灌溉技术开展了大量的研究工作[3-4]，王卫光等[5-6]指出判断咸水是否适宜农业灌溉主要取决于咸水的盐分含量及其组分，此外，灌溉方式和时间、作物耐盐性、灌区气候特征等也均影响咸水灌溉效果的重要因素。因此应依据区域气候特点、咸水资源现状以及作物的生长发育规律，选择合理的灌溉方式、灌溉水量、灌溉时间等，以确保在土壤水盐平衡条件下，实现作物不减产甚至增产的目标[7-8]。合理的咸水灌溉可以在不增加土壤盐分的条件下提高土壤湿度，保证作物正常生长和提高产量[8]；而如果利用不当，会造成土壤结构的破坏和次生盐渍化问题[4]。陈秀玲等[9]在河北东部平原南皮县进行咸水灌溉试验，指出控制土壤盐度不超过作物耐盐限度是咸水灌溉技术的关键；吴忠东等[10]在河北南皮进行不同矿化度咸水灌溉试验后提出 3 g·L^{-1} 微咸水是适合当地土壤并保证作物连续多年高产的灌溉水矿化度上限，除咸水含盐量外，配套的排水措施也在咸水灌溉土壤水盐调控中具有重要的作用；赵耕毛等[11]在山东滨海滩涂连续 3 年海水灌溉后发现土壤未表现积盐趋势，且在适宜灌排条件下可提高作物产量；Bnyamini 等[12]对 Jezre 平原利用土壤、地下水的盐分动态，开展了相关排水系统配置研究，实现了土壤水盐优化调控；Kass 等[8]在以色列沿海地区开展了地下咸水灌溉，研究表明合理的咸水灌溉方式可实现农田安全灌溉和作物增产。

然而对于环渤海低平原区，地下咸水矿化度普遍较高，平均约 7~22 g·L^{-1}，这对该地区咸水资源利用方式提过了新的挑战和要求。近年来，有研究针对高矿化度咸水资源的利用开展了深入和系统的工作，咸水在相变过程中可实现咸水的淡化。史培军等[14]在渤海湾利用海冰融化获取淡水；郭凯等[15-16]在冬季进行咸水结冰灌溉冻融方式在地下咸水中获取了微咸水和淡水，获取的微咸水和淡水可实现盐碱土耕层脱盐，结合后续的覆盖抑盐措施可为作物提供适宜的土壤低盐条件。以上方式是通过咸水在自然条件下固-液相转化过程实现了咸水的淡化，而咸水也可通过气-液相转化过程实现咸水的淡化。此外，地膜覆盖是盐碱地改良中的重要措施，具有阻碍水分垂直蒸发、减少土壤水分损失、提高土壤含水量、提高土壤水分利用率、减轻盐分表聚等优势[17-18]；相对于其他覆盖措施，也具有凝结土壤水汽回流入渗淋盐的作用。

基于以上分析，本研究拟通过春季直接利用高矿化度咸水进行灌溉结合地膜覆盖的方式实现以上过程，通过咸水灌溉提高土壤含水量，利用春季蒸发量大、昼夜温差大等自然特点，在灌溉咸水完全入渗后进行地膜覆盖，土壤中水分气化后在膜上凝结淡化，凝结淡水回流入渗实现表层土壤盐分的淋洗，以达到为作物出苗提供适宜的土壤低盐条件的目的。基于此，本文设置了春季咸水灌溉和地膜覆盖利用模式以及不同土壤含水量背景条件下春季咸水灌溉和地膜覆盖试验，调查土壤盐分淋洗效果，以探究春季咸水灌溉和地膜覆盖技术的效果和适用区域，为环渤海低平原区高矿化度咸水的利用提供新的途径和模式。

1　材料及方法

1.1　试验区概况

试验地点设在河北省海兴县滨海重盐碱地(北纬 37°56′10″~8°17′31″，东经 117°18′33″~17°50′57″，海拔 1.3~3.6 m)，该区属暖温带半湿润大陆性季风气候，年平均气温 12.1 ℃，1 月平均气温−4.5 ℃，极端最低气温−19.9 ℃，初霜冻多出现在 10 月下旬，终霜冻多出现在 4 月中旬。平均年降水量为 582.3 mm，主要集中

在 7—8 月，占年降水量的 74%，冬季降水量极少，仅占全年降水量的 5%~7%。该地区土壤盐分以 NaCl 为主，Cl^-占阴离子总量的 70%~80%，Na^+占阳离子总量的 90%以上，而盐分组成在剖面上垂直变异不明显。地下水含盐量以及地下水水位随季节变化明显，7—9 月由于雨水补给，地下水位 1 m 左右。春秋雨量较少时，蒸发量大，地下水埋深较深，春季干旱时期一般在 2.2 m 左右，地下水含盐量年际变化显著，在 7~22 $g\cdot L^{-1}$之间。

图 1 为海兴县 2016 年气温和降雨量的年度变化。试验期间 3—6 月的月平均气温分别为 8.50 ℃、14.06 ℃、20.86 ℃和 25.40 ℃。试验期间较为明显的降雨日期及降雨量如图 1 所示。3 月份昼夜温差 10 ℃左右。

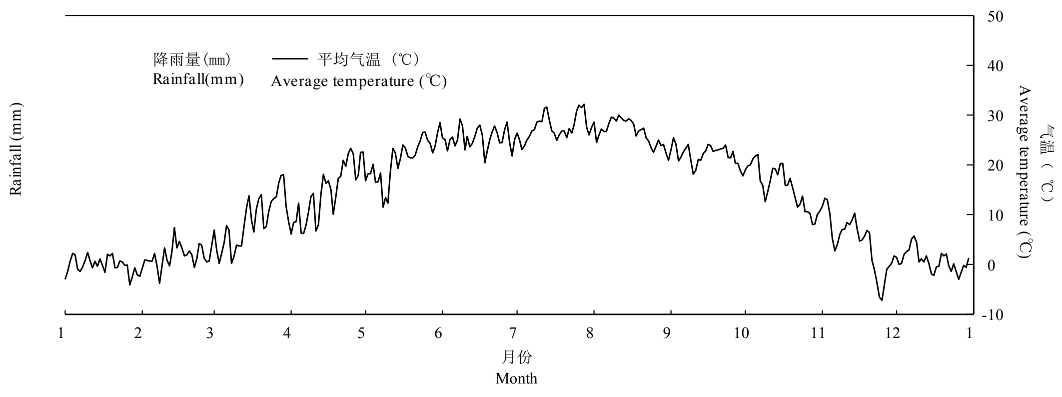


图 1　试验地点年度气温及降雨量(2016 年)

Fig. 1　Temperature and rainfall of the experimental site (2016)

1.2　试验设计

由于盐分在土壤中的运动受土壤水分驱动，而土壤水分运动与土壤含水量息息相关，因此选 2016 年春季选取初始土壤含水量差异较大的两地块(海兴县小山乡和在海兴县农场)进行进行春季咸水灌溉和地膜覆盖下土壤盐分淋洗效果试验。其中河北省小山乡地下水埋深较浅(1 m 左右)，春季土壤含水量水平较高(20%以上)；而海兴农场地下水埋深在 2.5 m 以下，春季土壤较干旱(20%以下)。两个试验地土壤初始水盐含量(3 月 6 日测定)如表 1。

表 1　两个试验点土壤初始水盐含量

Table 1　Initial soil moistures and salt contents in two experimental sites

土层深度 Soil depth (cm)	土壤含水量 Soil moisture content (%)		土壤含盐量 Soil salt content (%)	
	小山乡 Xiaoshan Town	海兴农场 Haixing Farm	小山乡 Xiaoshan Town	海兴农场 Haixing Farm
0~20	19.89	15.70	1.25	1.48
20~40	22.74	19.84	0.57	0.85
40~60	23.32	20.43	0.60	0.48

小山乡的试验设不灌咸水+不覆膜(对照, CK)，不灌咸水+覆膜(PM), 3 月 29 日灌咸水+不覆膜(SE), 3 月 29 日灌咸水+覆膜(SE+PM), 4 月 13 日灌咸水+不覆膜(SL), 4 月 13 日灌咸水+覆膜(SL+PM)共 6 个处理，每个处理重复 6 次。灌水后对应覆膜处理的地块立即进行地膜覆盖，小区面积 4 m·5 m，随机区组设计。为防侧渗，小区间 1 m 深的厚塑料膜隔开。

海兴农场的试验设 3 月 29 日灌咸水+覆膜(SE+PMN)、不灌咸水不覆膜(对照, CKN)两个处理。每个处理重复 6 次。灌水后对应覆膜处理的地块立即进行地膜覆盖，小区面积 4 m·5 m，随机区组设计。为防侧渗，小区间 1 m 深的厚塑料膜隔开。

两地灌溉水均来自试验地的排水渠，灌溉水量 180 mm。灌溉用咸水盐分状况及离子组成如表 2 所示。两地均在 6 月 1 日—2 日种植浅根系作物油葵(*Helianthus annuus*)‘G101’，行距 0.5 m，株距 0.3 m，密度 $3.9\cdot10^4$株$\cdot hm^{-2}$，播种方式采用人工拉线定点播种，整个生长期追肥及灌水(对照处理不灌水只追肥)，在出苗期和收获期调查出苗率及产量。

表 2　两个试验点灌溉用咸水含盐量及离子组成

Table 2　Salt contents and ions compositions of irrigation saline water in two experiment sites　$g\cdot L^{-1}$

试验点 Experimental site	全盐 Salt content	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+

小山乡 Xiaoshan Town	12.12	0.27	2.84	4.85	0.39	1.85	1.92
海兴农场 Haixing Farm	11.53	0.22	5.07	1.90	0.41	0.74	3.19

1.3 测定指标及方法

1)灌水前(2016 年 3 月 28 日)对两试验地各小区取土，测定背景值，按照 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 深度取土。灌后按照 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 深度取土，5 月 4 日前每 7 d 取土一次，插种时(6 月 1 日)及播种后 20 d 各取土一次，最后一次取土为 6 月 22 日，最后仅对成熟油葵进行产量测定。

土壤含水量用烘干法测得。以 1∶5 的土水比用蒸馏水浸提土壤溶液，对土壤浸提液测定盐分离子组成，用双指示剂法滴定法测定 HCO_3^-含量，用 $AgNO_3$滴定法测定 Cl^-含量，用 EDTA 间接络合滴定法测定 SO_4^{2-}含量，用 EDTA 滴定法测定 Ca^{2+}、Mg^{2+}含量；K^+、Na^+含量以阴阳离子含量之和为零的方法求得，再以各个阴阳离子的浓度之和求得土样的含盐量。

2)作物的出苗和产量。油葵出苗期调查每个小区的全部出苗数，计算出苗率；油葵成熟期每小区去除行首与行尾及边行，随机收获中间 20 株，晾干清洗后计产。

3)降雨量和气温数据。取自海兴小山乡试验基地自动监测气象站。

1.4 数据处理与统计方法

采用 SPSS 16.0 进行数据分析，Sigmaplot12.0 做图。

2 结果与分析

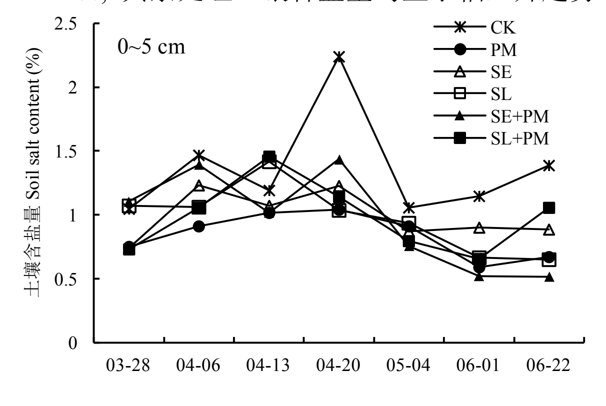
2.1 咸水灌溉和地膜覆盖对盐碱地土壤水盐动态的影响

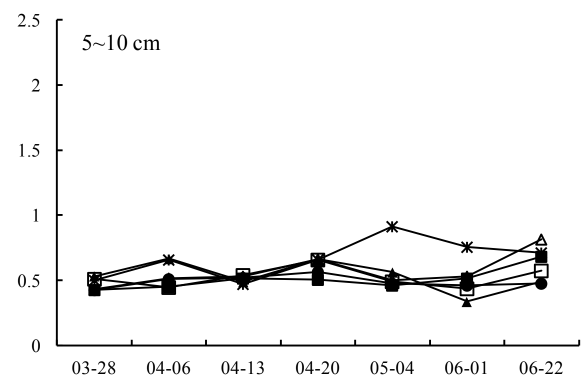
2.1.1 不同土层土壤含盐量的动态变化

从图 2 可以看出，0~5 cm 土层，至种植油葵前(6 月 1 日)，不覆膜处理土壤含盐量整体呈波动上升趋势，其中 CK 和 SE 处理在 4 月 6 日、4 月 20 日形成两个峰值：CK 处理土壤含盐量分别上升 40.13%和 113.70%、SE 处理土壤含盐量分别上升 66.32%和 65.70%。SL 处理受 4 月 18 日的降雨影响，0~5 cm 土层土壤含盐量受降雨淋洗一直呈下降趋势，6 月 1 日时土壤含盐量比初始值下降 37.96%。覆膜处理土壤含盐量整体呈下降状态，PM 处理先上升后下降，SE+PM 和 SL+PM 处理波动下降。至 6 月 1 日时 PM 和 SE+PM 处理土壤含盐量分别下降 21.26%和 52.97%；SL+PM 处理由于灌水覆膜时间较晚，土壤含盐量下降较少，仅为 10.30%。SE+PM 处理脱盐效果最高，土壤含盐量由 1.10%降至 0.52%，脱盐率达到 53.6%。但此时，各处理土壤含盐量均未降到油葵出苗标准，也导致了该试验区油葵出苗量极低。至油葵出苗后(6 月 22 日)，降雨增多。相对于油葵种植时(6 月 1 日)，CK 处理土壤含盐量上升 21.00%，SE 和 SL 处理分别下降 1.22%和 1.86%，说明大量咸水灌溉有一定的压盐效果，但远达不到脱盐需求。覆膜处理在后期无灌水补充情况下，仅有 SE+PM 处理维持脱盐效果，相对于油葵种植时(6 月 1 日)下降 0.69%，PM 和 SL+PM 处理土壤含盐量分别上升 12.90%和 40.38%。在油葵出苗期，由于降雨量增多且各处理无追加灌水，在降雨的淋洗作用下不覆膜处理的脱盐效果优于覆膜处理。至实验结束，SE+PM 处理脱盐效果最高，土壤含盐量由 1.10%降至 0.51%，脱盐率达到 53.6%。

5~10 cm 土层盐分变化与 0~5 cm 基本一致。6 月 22 日，CK 处理土壤含盐量较初始值升高 42.66%，PM 处理升高 11.06%，SE、SL 和 SL+PM 处理土壤含盐量上升 90.01%、12.08%和 25.36%，SE+PM 处理下降 7.8%。

10~40 cm 土层含盐量变化幅度较小，到 6 月 22 日仅有 SE+PM 处理维持了脱盐趋势，土壤含盐量下降 17.40%，其余处理土壤含盐量均呈小幅上升趋势。





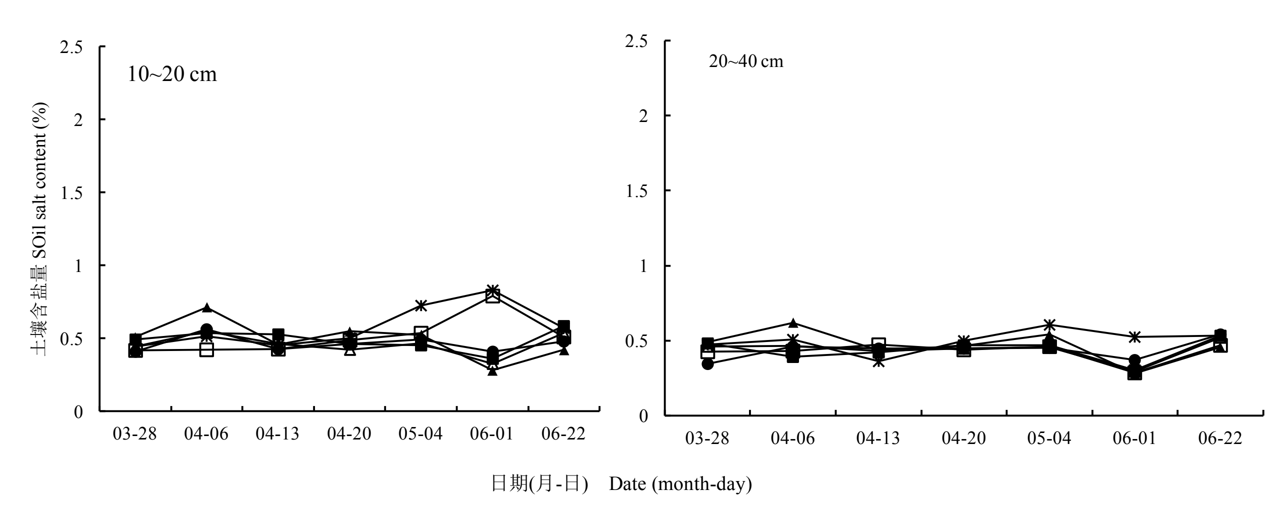


图 2 海兴县小山乡不同咸水灌溉和覆膜处理下各层土壤含盐量动态变化

Fig. 2 Dynamics of salt contents in different soil depths under different saline water irrigation and film multching treatments in Xiaoshan Town of Haixing County

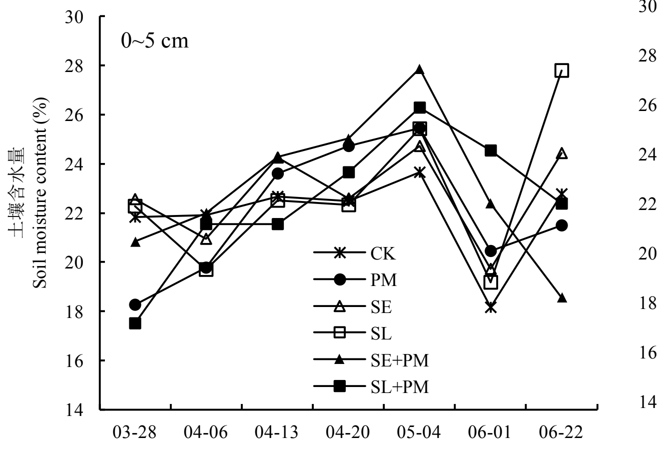
CK: 不灌咸水不覆膜; PM: 不灌咸水覆膜; SE: 3 月 29 日灌咸水不覆膜; SL: 4 月 13 日灌咸水不覆膜; SE+PM: 3 月 29 日灌咸水后覆膜; SL+PM: 4 月 13 日灌咸水后覆膜。CK: no irrigation without plastic film mulching; PM: plastic film mulching without saline water irrigation; SE: saline water irrigation on March 29th without plastic film mulching; SL: saline water irrigation on April 13th without plastic film mulching; SE+PM: saline water iriigation on March 29th with plastic film mulching; SL+PM: saline water irrigation on April 13th with plastic film mulching.

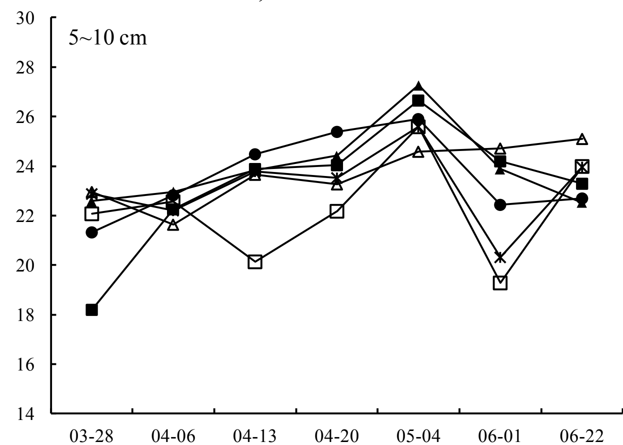
2.1.2 不同土层土壤含水量的动态变化

0~5 cm 土层含水量变化幅度较明显(图 3), 所有覆膜处理土壤含水量均呈先上升后缓慢下降趋势; 不覆膜处理受气温及降雨影响, 均呈波动下降趋势。6 月 1 日, 由于降雨少、蒸发量大, 覆膜处理土壤水分蒸发膜上凝结回流入渗, 表层土壤含水量均呈上升趋势, PM、SE+PM 和 SL+PM 处理分别上升 11.92%、7.41% 和 40.04%; 不覆膜处理土壤含水量此时均低于初始值, CK、SE、SL 处理分别下降 16.86%、12.60%、13.87%。由此可见在旱期, 地膜覆盖起到了较好的保水作用, 尤其体现在咸水灌溉和地膜覆盖处理中。此后, 由于降雨量增多, 覆膜处理受地膜覆盖影响, 水分入渗较少, 6 月 22 日相对于 6 月 1 日 SE+PM、SL+PM 处理土壤含水量则分别降低 17.06%和 8.71%。

5~10 cm 土层含水量变化和 0~5 cm 基本一致, 除有明显降雨前后, 其他时期变化幅度较小。灌咸水后, 覆膜处理的土壤含水量稳定在 22%~26%之间, 不覆膜处理则波动较大。

10~40 cm 土层土壤初始含水量较高, 在 22%~24%左右, 后期波动幅度在 9%左右, 且各处理土壤含水量变化趋势基本一致。各处理中, SE+PM 处理的土壤含水量高于其他处理, 同时覆膜处理高于不覆膜处理。





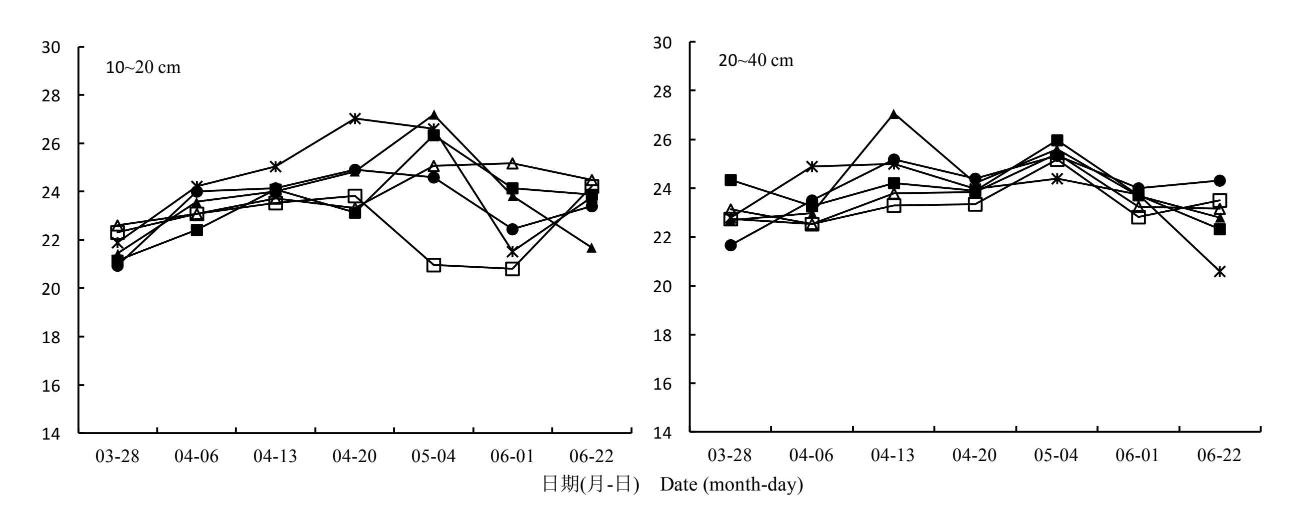


图 3　海兴县小山乡不同咸水灌溉和覆膜处理下各层土壤质量含水量动态变化

Fig. 3　Dynamics of soil water contents in different depths under different saline water irrigation and film multching treatments in Xiaoshan Town of Haixing County

CK: 不灌咸水不覆膜; PM: 不灌咸水覆膜; SE: 3 月 29 日灌咸水不覆膜; SL: 4 月 13 日灌咸水不覆膜; SE+PM: 3 月 29 日灌咸水后覆膜; SL+PM: 4 月 13 日灌咸水后覆膜。CK: no irrigation without plastic film mulching; PM: plastic film mulching without saline water irrigation; SE: saline water irrigation on March 29th without plastic film mulching; SL: saline water irrigation on April 13th without plastic film mulching; SE+PM: saline water iriigation on March 29th with plastic film mulching; SL+PM: saline water irrigation on April 13th with plastic film mulching.

2.2　不同土壤初始含水量下春季咸水灌溉和地膜覆盖对土壤水盐动态的影响

由小山乡田间试验可知，当土壤初始质量含水量>20%时，咸水灌溉+覆膜的脱盐深度较浅仅为 5 cm 左右，盐分淋洗效果较差。因为土壤本身含水量较高，土壤中的大孔隙被水分填满，上层水分多以饱和导水率的速度下渗，造成土壤盐分淋洗缓慢，脱盐层浅。因此，同期开展了土壤初始质量含水量<20%时的咸水灌溉地膜覆盖试验。

如图 4 所示，灌咸水覆膜后(4 月 13 日)，由于不再受浅层地下咸水影响，该地区两处理各土层含盐量变化较为稳定状态。与灌水前(3 月 28 日)相比, S+PMN 处理全土层盐分均有大幅下降, 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别下降 76.70%和 74.45%, 0~60 cm 土层平均下降 75.06%; CKN 处理全土层盐分上升, 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别上升 22.56%和 29.69%, 0~60 cm 土层上升 19.76%。此时, S+PMN 处理全土层平均含盐量为 0.49%，低于 CKN 处理 71.91%。

种植油葵时(6 月 1—2 日), S+PMN 处理的土壤含盐量依然保持这种较低水平。油葵出苗后(6 月 22 日), CKN 处理全土层平均土壤含盐量 1.05%, S+PMN 处理为 0.13%。S+PMN 处理土壤含盐量远远低于 CKN 处理，且已达到油葵出苗要求。

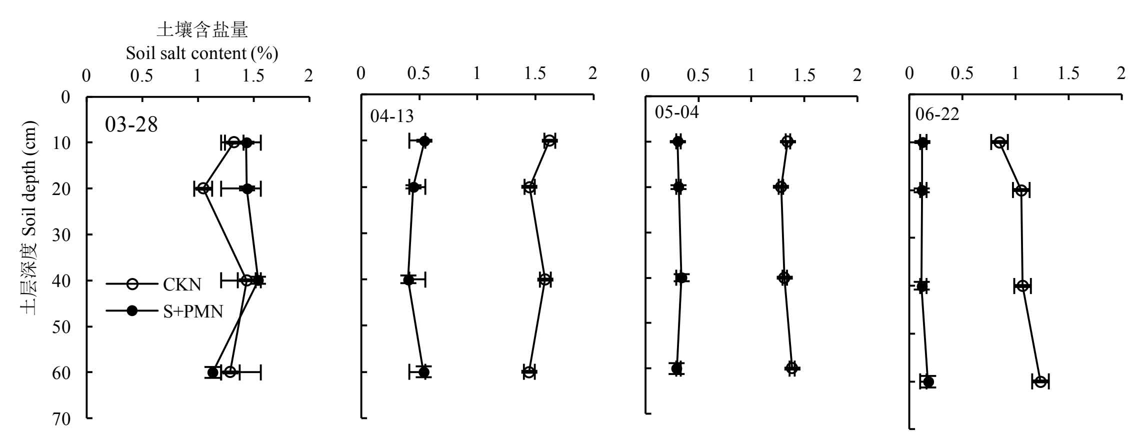


图 4　海兴农场咸水灌溉和地膜覆盖下 0~60 cm 土层土壤含盐量的变化

Fig. 4　Variation of salt content in 0–60 cm soil profile in Haixing Farm under saline water irrigation with plastic film mulching

CKN: 不灌咸水不覆膜; S+PMN: 灌咸水后覆膜。CKN: no irrigation without plastic film mulching ; SE+PMN: saline water iriigation with plastic film mulching.

从图 5 可知，灌溉前两处理土壤含水量差异较小，灌咸水后(4 月 13 日), S+PMN 处理的土壤含水量显著高于 CKN 处理, 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别提高 20.93%和 17.53%。20 cm 土层以下土壤含水量两处理差异不大。

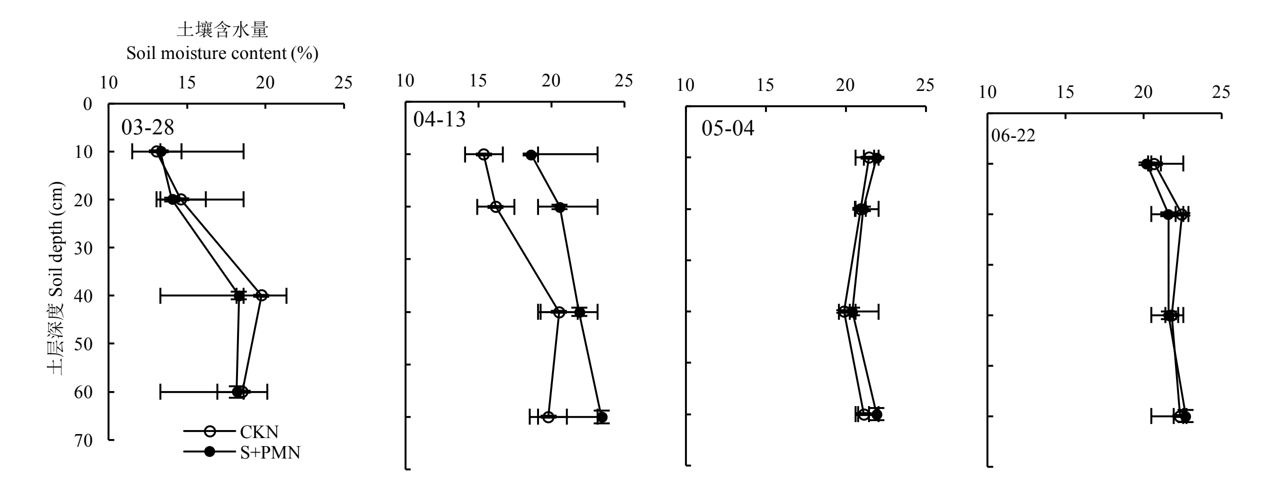


图 5　海兴农场咸水灌溉和地膜覆盖下 0~60 cm 土层土壤水分变化

Fig. 5　variation water content in 0–60 cm soil profile in Haixing Farm under saline water irrigation with plastic film mulching

CKN: 不灌咸水不覆膜, S+PMN: 灌咸水后覆膜。CKN: no irrigation with no plastic film mulching as control, S+PMN: saline water iriigation with plastic film mulching.

2.3　春季咸水灌溉和地膜覆盖对油葵出苗和产量的影响

2016 年 6 月 1—2 日，在两个试验地点分别种植了浅根系作物油葵。油葵发芽和苗期生长的临界盐分为 0.4%左右，超过这一临界值[17]，油葵不出苗和生长。由于小山乡土壤盐分背景值较高，脱盐层次较浅，表层土壤盐分超出了油葵的耐受范围，致使油葵出苗较少，最终导致绝收。而在土壤含水量水平较低的海兴农场，由于脱盐深度深，表层的脱盐效果好，在油葵播种期表层(0~20 cm)土壤含盐量降低到 0.32%，土壤质量含水量达到 22.5%，种植作物油葵后，其出苗和产量分别达到 73.9%和 920 kg·hm^{-2}(表 4)，而对照处理由于播种时较高的土壤盐分，油葵出苗率极低，最终导致绝收。

表 4　海兴农场咸水灌溉和地膜覆盖下油葵的出苗率和产量

Table 4　Emergence ratio and yield of oil sunflower under saline water irrigation with plastic film mulching in Haixing Farm

处理 Treatment	油葵出苗率 Emergence rate of oil sunflower (%)	油葵产量 Yield of oil sunflower (kg·hm^{-2})
S+PMN	73.9	920
CKN	0	/

CKN: 不灌咸水不覆膜, S+PMN: 灌咸水后覆膜。CKN: no irrigation with no plastic film mulching as control, S+PMN: saline water iriigation with plastic film mulching.

3　讨论

油葵是相对比较耐盐的浅根系油料作物，但是出苗及苗期生长仍对盐胁迫比较敏感。春季咸水灌溉和地膜覆盖模式可创造春季淡化的土壤耕层，为油葵播种出苗提供了适宜的土壤低盐条件。本研究结果表明，春季咸水灌溉和地膜覆盖可以起到降低土体盐分的作用，有一定的表层盐分淋洗的效果，甚至可以达到满足油葵出苗及苗期生长所要求的土壤条件。咸水灌溉和地膜覆盖相结合在干旱、半干旱盐渍区具有较为广阔的应用前景。然而，春季咸水灌溉效果与初始土壤含水量有关。水分在土壤中的入渗剖面受土壤含水量的影响较大，只有在初始含水量较低时，水分入渗后在土壤中的分布才具有近似梯形的剖面，且土壤盐分大部分在湿润峰位置积累，随着土壤初始含水量的升高，水分主要通过土壤大孔隙下渗，大部分集中于小孔隙中的盐分很难被充分淋洗[19]。马东豪等[20]研究表明：土壤含水量越低，咸水入渗后上层含盐量越小，下层含盐量越大，土壤盐分的淋洗效率也就越高。这与本研究结果基本一致，在初始土壤含水量较高的小山乡盐碱地进行春季咸水灌溉和地膜覆盖后，仅 0~5 cm 土层实现了脱盐，且脱盐效率较低；而在初始土壤含水量较低的海兴农场，通过春季咸水灌溉和地膜覆盖可实现 0~60 cm 土层的盐分淋洗，且 0~20 cm 土层土壤含盐量的脱盐率达到 70%以上，土壤含盐量降低至 0.2%以下，实现了作物(油葵)的正常种植。因此，在春季进行咸水灌溉覆膜措施时，为达到较好脱盐效果，应在土壤含水量较低的地点实施咸水灌溉和地膜覆

盖措施。此外，春季咸水灌溉和地膜覆盖是基于咸水灌溉水分入渗和地膜覆盖后土壤水分蒸发凝结回流过程实现了，其中咸水灌溉和地膜覆盖分别对土壤盐分淋洗的贡献率方面仍需要进一步定量化的研究。

许多研究结果均表明高矿化度咸水很难直接利用于农业灌溉[3-5]，但在极端条件下也有与区域特点相适应的高矿化度咸水灌溉的研究。马学喜等[22]研究在塔克拉玛干沙漠用矿化度 28 g·L^{-1} 的咸水灌溉，柽柳(*Tamarix chinensis*)依然达到了 75%的成活率，20 g·L^{-1} 的咸水灌溉下成活率则可达到 80%以上；史培军等[14]利用海冰的收集、储藏和融化等实现了海水资源的利用和盐碱地改良；郭凯等[15-16]通过冬季咸水结冰灌溉的方式，实现了滨海区高矿化度地下咸水的利用。本研究中，在滨海区春季干旱及土壤积盐高峰期，通过高矿化度咸水灌溉和地膜覆盖的方式也可实现表层盐分的淋洗。此外，咸水灌溉时，灌溉水的盐分与土壤相互作用过程中，可促进土壤絮凝作用、改善土壤结构、提高土壤通气透水性，随着灌溉水矿化度的升高，咸水入渗速度加快[23]。这为地膜覆盖后蒸发凝结在地膜上的淡水提供了良好的入渗条件，这也是春季高矿化度咸水灌溉和地膜覆盖对土壤盐分具有较好淋洗效果重要原因，且这一措施实施越早，约有利于盐分淋洗。

4 结论

淡水资源极度匮乏和土壤盐碱化严重制约了环渤海地区农业生产，依据区域水资源及气候特点，针对该地区春季季节性干旱和土壤爆发式积盐，本研究开展了春季咸水灌溉和地膜覆盖的咸水利用方式的相关试验，试验结果表明：春季咸水灌溉和地膜覆盖可以在春季有效提高土壤含水量，降低表层土壤含盐量。土壤初始含水量对咸水灌溉和地膜覆盖下的盐分淋洗效果影响明显，且低土壤含水量条件下的盐分淋洗深度深、脱盐率高，同时也可实现浅根系耐盐作物(油葵)的正常生长。因此，春季咸水灌溉和地膜覆盖是滨海区高矿化度咸水利用和耕层土壤盐分淋盐的有效方式，这为滨海盐渍区咸水资源利用提供了的新思路。

但是，春季咸水灌溉结合地膜覆盖是一个复杂的动态变化过程，涉及了气态淡水的凝结回流、水分和盐分在土壤中的运移，在这个动态过程中收到诸多因素的影响，如气态淡水蒸发量、地下水埋深和水质、灌溉时间和水量等，针对以上问题的研究仍需进一步完善。

参考文献 References

[1]王遵亲．中国盐渍土[M]．北京：科学出版社, 1993

Wang Z Q. Chinese Saline Soil[M]. Beijing: Science Press, 1993

[2]郭凯，张秀梅，李向军，等．冬季咸水结冰灌溉对滨海盐碱地的改良效果研究[J]．资源科学, 2010, 32(3): 431–435

Guo K, Zhang X M, Li X J, et al. Effect of freezing saline water irrigation in winter on the reclamation of coastal saline soil[J]. Resources Science, 2010, 32(3): 431–435

[3]王全九，徐益敏，王金栋，等．咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J]．灌溉排水, 2002, 21(4): 73–77

Wang Q J, Xu Y M, Wang J D, et al. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(4): 73–77

[4]张余良，陆文龙，张伟，等．长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]．农业环境科学学报, 2006, 25(4): 969–973

Zhang Y L, Lu W L, Zhang W, et al. Effects of long term brackish water irrigation on characteristics of agrarian soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 969–973

[5]王卫光，张仁铎，王修贵．咸水灌溉下土壤水盐变化的试验研究[J]．灌溉排水学报, 2004, 23(3): 1–4

Wang W G, Zhang R D, Wang X G. Water and salt transport on saline water irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(3): 1–4

[6]吴忠东，王卫华，张照录，等．咸淡组合淋洗对土壤水盐分布特征的影响[J]．排灌机械工程学报, 2014, 32(12): 1085–1090

Wu Z D, Zhang W H, Zhang Z L, et al. Effect of infiltrated by fresh and saline water alternately on water-salt distribution properties[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(12): 1085–1090

[7]阮明艳．咸水灌溉的应用及发展措施[J]．新疆农垦经济, 2006, (4): 66–68

Ruan M Y. The application of salt water and its developing measures[J]. Xinjiang State Farms Economy, 2006, (4): 66–68

[8]李红，李庆朝．微咸水灌溉对小麦、玉米及土壤盐分的影响[J]．山东农业大学学报：自然科学版, 2007, 38(1): 72–74

Li H, Li Q C. Effects of brackish water irrigation on wheat, maize and soil salt[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2007, 38(1): 72–74

[9]陈秀玲，郭永辰．咸水灌溉技术[J]．农田水利与小水电, 1993, (7): 7–10

Chen X L, Guo Y C. Salt water irrigation technology[J]. China Rural Water and Hydropower, 1993, (7): 7–10

[10]吴忠东，王全九．入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]．农业机械学报, 2010, 41(7): 64–69

Wu Z D, Wang Q J. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 64–69

[11]赵耕毛，刘兆普，陈铭达，等．海水养殖废水灌溉条件下 SPAC 系统中水盐肥通量研究[J]．土壤学报, 2006, 43(6): 961–965

Zhao G M, Liu Z P, Chen M D, et al. Study on fluxes of water, salts and nutrients in soil-plant-atmosphere continuum under irrigation with saline aquaculture wastewater[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(6): 961–965

[12] Benyamini Y, Mirlas V, Marish S, et al. A survey of soil salinity and groundwater level control systems in irrigated fields in the Jezre'el Valley, Israel[J]. Agricultural Water Management, 2005, 76(3): 181–194

[13] Kass A, Gavrieli I, Yechieli Y, et al. The impact of freshwater and wastewater irrigation on the chemistry of shallow groundwater: A case study from the Israeli Coastal Aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2005, 300(1/4): 314–331

[14]史培军，顾卫，王静爱，等. 海冰资源淡化研究与利用技术开发[J]. 资源科学, 2010, 32(3): 394–404

Shi P J, Gu W, Wang J A, et al. Development of technology for sea ice desalination and utilization of sea ice resources[J]. Resources Science, 2010, 32(3): 394–404

[15]郭凯，刘小京. 咸水结冰融化过程中水质与水量的变化规律初步研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 56–60

Guo K, Liu X J. The primary research on the variation of melted water quality and quantity during saline ice melting[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(1): 56–60

[16]郭凯，陈丽娜，张秀梅，等. 不同钠吸附比的咸水结冰融水入渗后滨海盐土的水盐分布[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 506–510

Guo K, Chen L N, Zhang X M, et al. Water and salt distribution in coastal saline soil after infiltration of melt-water of saline water ice with different sodium adsorption ratio[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 506–510

[17]赵永敢，王婧，李玉义，等. 秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 109–117

Zhao Y G, Wang J, Li Y Y, et al. Reducing evaporation from phreatic water and soil resalinization by using straw interlayer and plastic mulch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 109–117

[18]郑力群，陈铭达，刘兆普，等. 地面覆盖对盐渍土水热盐运动及作物生长的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(2): 93–97

Deng L Q, Chen M D, Liu Z P, et al. Effects of different ground covers on soil physical properties and crop growth on saline-alkaline soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(2): 93–97

[19]刘金涛，李晓鹏，陈喜,等. 间歇降雨中土壤含水量分布及其对入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5):96–100

Liu J T, Li X P, Chen X, et al. Distribution characteristics of initial soil water content in profile during hiatus rainfall-infiltration events and its effects on infiltration[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(5):96–100

[20]马东豪，王全九，苏莹，等．微咸水入渗土壤水盐运移特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 62–66

Ma D H, Wang Q J, Su Y, et al. Analysis of the characteristics of soil water and salt movement in saline water infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(1): 62–66

[21]吴忠东，王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 64–69

Wu Z D, Wang Q J. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 64–69

[22]马学喜，李生宇，徐新文，等. 咸水灌溉对三种柽柳幼苗成活和生长状况的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(1): 185–190

Ma X X, Li S Y, Xu X W, et al. Effects of different mineralized irrigation water on seedling survival and growth of three species of Tamarix in Taklimakan desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(1): 185–190

[23]杨军，邵玉翠，高伟,等. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量的影响研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 17–20

Yang J, Shao Y C, Gao W, et al. Effects of saline water irrigation on soil salinity and crop yield[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(2): 17–20